

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0112

韦晓伟,张洪波,辛琛,等.变化环境下流域气象水文要素的相关性演化[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):17-26. WEI X W, ZHANG H B, XIN C, et al. Evolution of correlation analysis of hydro-meteorological variables in the basin under changing environment[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6): 17-26. (in Chinese)

变化环境下流域气象水文要素的相关性演化

韦晓伟¹, 张洪波^{1,2}, 辛琛³, 杨建涛¹, 李慈¹

(1. 长安大学 水利与环境学院, 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054; 3. 陕西省江河水库工作中心, 西安 710018)

摘要:为了探究流域气象水文要素间相关性结构及其演化,采用交叉小波分析、去趋势波动分析(DFA)、去趋势互相关分析(DCCA)和去趋势偏互相关分析(DPXA)对渭河流域 1960—2015 年的气象水文数据(年降水量、年蒸发皿蒸发量、年径流深等)进行了时频域相关性分析和长程相关性分析,探讨气象水文要素间的相关性结构变化和长程相关性特征。交叉小波分析表明,研究期内蒸发、降水、径流任意两因子间相关性在不同时频域存在差异,相关结构上存在 1~2 和 8 a 的相似主导周期,宏观上降水-径流间多尺度相关结构发生退化,共振周期减少。长程相关分析表明,径流、蒸发和降水序列的 Hurst 指数均大于 0.5,表现出良好的长持续性特征,当前降水(径流、蒸发)会对未来某一时刻的降水(径流、蒸发)产生影响;DCCA 结果表明,降水-径流间表现出长程相关性,而降水-蒸发和径流-蒸发呈长程反相关性,呈现出不同的长程互相关结构;DPXA 结果表明,扣除第三因子影响后,降水-蒸发和径流-蒸发长程相关性发生突变,而降水-径流、降水-蒸发和径流-蒸发两两间均呈长程互相关性,暗示降水、径流和蒸发三者间长程相关性的互馈特征,相比于 DCCA 结果,DPXA 的结果显然更具有说服力。透过滑窗分析可发现降水-径流、降水-蒸发之间的长程互相关性在时域上没有发生突变,未来降水量的可能增加将引起径流量增大,并间接引起渭河流域受水量制约的蒸发量增大;径流-蒸发间长程互相关性于 1962 年由长程反相关突变为长程相关,随后长程相关性持续增强,标志着渭河流域未来蒸发的变化可能会引发更大的径流波动。

关键词:气象水文;相关性演化;变化环境;交叉小波;渭河流域

中图分类号:TV214;P333

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Evolution of correlation analysis of hydro-meteorological variables in the basin under changing environment

WEI Xiaowei¹, ZHANG Hongbo^{1,2}, XIN Chen³, YANG Jiantao¹, LI Ci¹

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region, Ministry of Education Chang'an University, Xi'an 710054, China;

3. Administration of Rivers and Reservoirs in Shaanxi Province, Xi'an 710018, China)

Abstract: In order to evaluate and investigate the correlation structures of hydro-meteorological variables in the Wei River basin, the time-frequency domain correlation analysis and long-range correlation analysis were carried out by cross wavelet analysis, detrended fluctuation analysis (DFA), detrended cross-correlation analysis (DCCA), and detrended partial cross-correlation analysis (DPXA). The results of cross wavelet analysis show that correlation between precipitation (P), pan evaporation (E), and runoff depth (R) differ at different time-frequency domain. In terms of correlation structure, there were 1-2 years and 8-year periods existed in the system consisted of P, R, and E. On the macro scale, the multi-scale correlation structures between precipi-

收稿日期:2020-02-11 修回日期:2020-05-25 网络出版时间:2020-06-03

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20200602.1345.002.html>

基金项目:国家自然科学基金(51979005);陕西省水利厅科技计划(2018slkj-11);陕西省自然科学基金(2020JM-250)

作者简介:韦晓伟(1994—),男,河南洛阳人,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:2017129014@chd.edu.cn

通信作者:张洪波(1979—),男,辽宁康平人,教授,博士生导师,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:hbzhang@chd.edu.cn

tation and runoff degraded and resonance period were reduced. Long-range correlation analysis showed that the Hurst index of R, E, and P sequences were greater than 0.5, showing long-term persistence characteristics. The current precipitation (runoff and evaporation) might have an impact on the precipitation (runoff and evaporation) at a certain time in the future. The DCCA results show that there was a long-range correlation between P and R, while an inverse long-range correlation existed between P-E and R-E, showing different cross-correlation structures. The DPXA results show that the long-range correlation change and turn into long-range correlation, implying the feed-back characteristics of long-range correlation among P, R, and E. Compared with the results of DCCA, the DPXA was more persuasive. The sliding-window analysis (30 years) showed that the long-range correlation between P-R and P-E did not change in the time domain, and the possible increase of precipitation in the future may lead to the increase of runoff and indirectly lead to the increase of evaporation in the Wei River basin. The long-range correlation between R-E changed from long-range inverse correlation to long-range correlation in 1962, and then the long-range correlation continued to increase, indicating that future evaporation changes in the Wei River basin may cause more runoff fluctuations. Therefore, water resources management based on ET control may have a certain significance to increase the available water amount in the Wei River basin.

Key words: hydro-meteorology; correlation evolution; environment change; cross wavelet; Wei River basin

受人类活动和气候变化双重驱动,变化环境下的流域水文循环已发生深刻变化^[1],许多地区的实测降水、蒸发和径流序列都呈现出了非平稳性特征^[2-3]。从长时期的水量平衡方程可知,水文循环中降水、蒸发和径流之间一般存在相互影响、相互促进的平稳互馈关系^[4],这也是开展流域水文模拟与水资源规划的基础,而在变化环境下,受人类活动扰动,降水、蒸发和径流序列的统计特征(均值、方差和趋势)则有可能发生显著变化^[5-7],那么诸如原有的互馈机制是否依旧存在、如何认识并利用三者的相关性机制解决目前所面临的气象水文问题等一系列的问题都迫切要求开展流域气象水文数据序列间的相关性变化研究,以揭示变化环境下气象水文要素间的互馈相关机制和演化规律。

气象水文要素的相关性演化分析多基于年际尺度,时间序列长程相关性分析方法是其核心工具,主要包括波动分析(FA)、去趋势波动分析(DFA)^[8]、多重分形去趋势波动分析(MF-DFA)^[9]、去趋势滑动平均分析(DMCA)^[10]等。波动分析法(FA)最早源于核苷酸序列的相关性研究,后来被广泛应用于长程相关领域,但该方法也存在一定局限,即不能很好地研究分析有趋势时间序列。为此,Peng 等^[8]提出了去趋势波动分析(DFA),基于标度指数分析时间序列的长程相关性,它的优点在于可有效地滤去序列中的趋势成分,能检验有噪声且叠加多项式趋势序列的长程相关问题。后来,在此基础上,学者进一步发展了去趋势互相关分析(DCCA)^[11]和去趋势偏互相关分析(DPXA)^[12,18]方法。去趋势互相关分析是去趋势波动分析方法对两个时间序列情况的拓展,其通过引入标准的协方差分析实施改进^[11],通

过系统滤去各阶趋势成分、消除原始序列中数据非平稳性的影响,从而有效避免数据非平稳性所导致的序列之间的伪相关现象。目前,DCCA 主要用于分析两个同期非平稳时间序列的幂律相关性特征,在金融学、物理学和气象学等领域已得到广泛应用^[13-17],如:Vassoler 等^[17]将 DCCA 方法应用于世界各地多站点的气象数据资料分析,定量研究了多个城市(如越南首都河内、美国丹佛)的气温与相对湿度相关性;吴晓升等^[18]基于 DCCA 方法对美国不同地区的光照、风速及温度进行不同尺度下互相关性分析,并通过构建风光互补发电场景,分析了风光互补的总体特性和季节特征。去趋势偏互相关分析(DPXA)是在去趋势互相关分析(DCCA)基础上升级而来的,主要用于定量去除一个因素对另外两因素影响后的“真实”相关性^[12]。刘亚敏^[12]提出去趋势偏互相关分析模型,并在黄金、石油价格及美元指数和股票市场领域进行了实证研究。2015 年,Qian 等^[19]在 DCCA 基础上对该方法进行改进,简称 DPXA,提出了多尺度偏互相关系数,用于反映要素间的偏相关水平,通过模拟和实证分析表明基于多尺度偏互相关系数的去趋势偏互相关分析结果比去趋势互相关分析模型具有更高的可靠性和准确性^[20]。同期,Yuan 等^[20]提出了另一种去趋势偏互相关分析,简称 DPCCA。该方法与 DPXA 法解决问题的思路是相似的,但在偏相关系数上存在较大不同,是将偏相关系数用于 DCCA 法改进的一种新方法,已被应用于气象学领域。

目前,去趋势偏互相关分析(包括 DPCCA 和 DPXA)作为研究分析多个同期非平稳时间序列相关关系的方法被提出不久,尽管在气象学领域已

有涉猎^[20],但鲜有学者将该方法应用于气象水文要素间长程相关性及其演化规律的探讨。文献[21]应用去趋势偏互相关分析法(DPCCA)对渭河流域降水-径流-蒸发序列的长程互相关性做了简要分析,论证了降水-径流序列间“真实”相关性的存在,但对降水-径流-蒸发序列的互馈机制以及变化环境下的演化规律尚未涉及,研究深度较为有限。本文拟采用交叉小波和DPXA法,重点解析降水、蒸发和径流等气象水文序列间长程相关性的演化过程,探讨流域降水、蒸发、径流间的互馈影响机制及其变化,为流域的水资源规划与管理提供科学参考。

1 研究区概况及数据来源

渭河流域位于 $103^{\circ}55' \sim 110^{\circ}20' \text{E}$ 、 $33^{\circ}40' \sim 37^{\circ}25' \text{N}$,流域总面积 13.48万 km^2 。渭河流域地处大陆性季风气候区,年平均气温在 $7.8 \sim 13.5^{\circ}\text{C}$,最高气温是 42.8°C ,最低气温 -28.1°C 。渭河流域

降水量总体偏小,多年平均降水量仅 552.3 mm ,年际变化不大,年内分配不均,汛期(6—9月)降水较为集中,约占全年总降水量的60%。降水量空间变化趋势总体为南多北少,且山谷区多、高原区少。受气候条件影响,渭河流域属蒸发强烈区,多年平均水面蒸发量(蒸发皿)为 1567.2 mm ,且时空分布不均。渭河水系发达,支流众多,流域面积在 1000 km^2 以上的支流就有14条,多年平均径流量 97.11 亿 m^3 (1956—2000年)。

本文所采用的实测年径流数据来自位于渭河干流的华县站和北洛河的状态站,实测年降水量和年蒸发皿蒸发量数据来自渭河流域上的19个气象站,选取的资料长度为1960—2015年(56 a),分析中采用泰森多边形法将点数据折算为面数据。所选的数据资料来源于中国气象数据网和黄河水利委员会水文局汇编的《黄河流域水文资料》。图1为渭河流域降水量、径流深及蒸发皿蒸发量的年际变化。

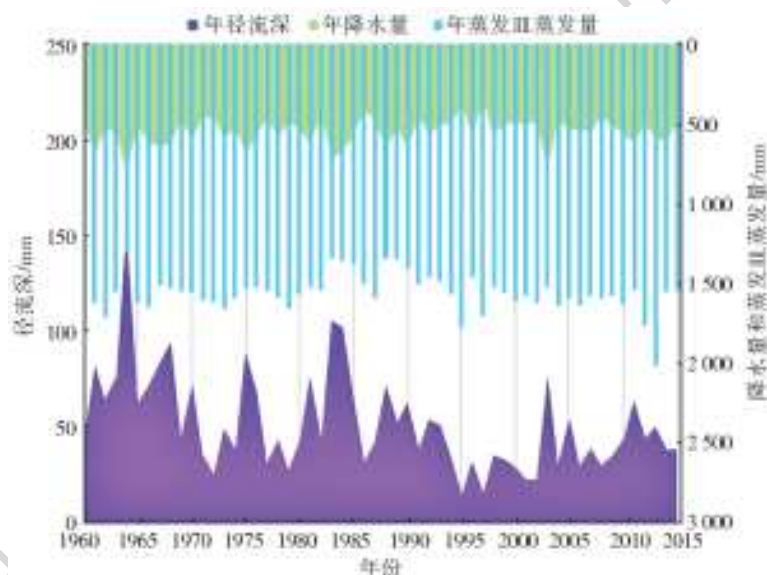


图1 渭河流域水文、气象要素的年际变化

Fig. 1 Changes of hydrological and meteorological elements of the Wei River basin

2 研究方法

为了揭示渭河流域降水、径流、蒸发序列的相关性演化关系,运用交叉小波分析方法对渭河流域不同要素的历史时间序列进行年尺度时频域相关性分析,揭示气象水文要素间相关性演化规律和时频域差异;采用去趋势波动分析法(DFA)、去趋势互相关分析法(DCCA)和去趋势偏互相关分析法(DPXA)分析渭河流域年尺度气象水文数据序列长程相关性特征,探明气象水文要素间相关关系的持续性,预测其演化趋势;应用滑窗算法对其持续性进行验证,探索气象水文要素间相关关系的突变特征。图2为流域

气象水文要素相关性演化分析的集成研究框架。



图2 气象水文要素间相关性研究框架

Fig. 2 Research framework of correlations between hydrological and meteorological variables

其中,交叉小波分析、DFA、DCCA 和 DPXA 可实现非平稳时间序列的相关性的有效解析,且不同方法的侧重有所不同,通过这些方法的集成应用,可更为全面地揭示气象水文系统要素间的相关关系演化规律与互馈机制,为流域水资源合理配置以及气候变化应对提供科学参考。

2.1 交叉小波分析方法

交叉小波分析是由交叉谱分析与小波变换两种方法相结合而产生的一种在时频域中分析两个信号相关性的分析方法^[22],能够有效地分析两个时间序列之间的相关程度,并反映其在时频域上的位相结构和其细部特征。近年来,交叉小波分析已被广泛应用于气象^[22-24]、水文^[25-26]等多个学科领域。其中,交叉小波功率谱能揭示两个时间序列共同的高能量区与位相关系,但对于分析时频空间的低能量区还存在一定不足,而交叉小波凝聚谱则较好地弥补了这一点。对降水、蒸发、径流历史实测序列进行多时间尺度关联性分析时,对其中任意两个序列进行交叉小波功率谱及凝聚谱计算,功率谱越大,表明两者具有共同的高能量区,相关显著。凝聚谱越大,则表明两者在中低能量区相关显著。

计算主要基于 Morlet 小波进行,功率谱和凝聚谱的计算如下。

对于时间序列 $\{X(i)\}$ 和 $\{Y(i)\}$,其中 $i=1, 2, \dots, N$,它们的交叉小波功率谱(XWT)可定义为

$$|W_{XY}(\alpha)| = C_X(\alpha)C_Y^*(\alpha) \quad (1)$$

式中: α 为时滞; $C_X(\alpha)$ 为序列 $\{X(i)\}$ 的小波变换系数; $C_Y^*(\alpha)$ 为序列 $\{Y(i)\}$ 的小波变换系数的复共轭。

反映两个小波变换在时频域相干程度的交叉小波凝聚谱(WTC),可定义为

$$R^2(\alpha, N) = \frac{|S(\alpha^{-1}W_{XY}(\alpha))|^2}{S(\alpha^{-1}W_X(\alpha))S(\alpha^{-1}W_Y(\alpha))} \quad (2)$$

式中: S 为平滑算子。

本文中,交叉小波功率谱和凝聚谱主要用于分析气象水文要素序列的相关性尺度演化特征。

2.2 长程相关性分析方法

长程相关性分析方法涉及去趋势波动分析(DFA)、去趋势互相关分析(DCCA)和去趋势偏互相关分析(DPXA)。其中:DFA 主要用于检验单个非平稳时间序列的长程相关性,回答单一序列的持续性问题;DCCA 主要用于两组序列的长程互相关检测,重点回答序列间的结构性问题;DPXA 主要用于 3 组序列扣除单一序列影响后的两序列的长程互相关检测问题,重点解决要素间的互馈机制分析问题。由于 DFA 方法相对成熟,也极为常见,此处

不再赘述,具体方法步骤可参考文献[8]。

2.2.1 去趋势互相关分析

去趋势互相关分析(DCCA)可检测两组非平稳时间序列(含有噪声且叠加有多项式趋势信号)的长程互相关性^[16,27]。DCCA 的长程互相关指数计算步骤如下。

(1)假定非平稳时间序列 $\{X(i)\}$ 和 $\{Y(i)\}$,其中 $i=1, \dots, N$,对其分别过滤均值并累加后得到序列 $X'(k) = \sum_{i=1}^k [x(i) - \bar{x}]$ 和 $Y'(k) = \sum_{i=1}^k [y(i) - \bar{y}]$, $k=1, \dots, N$ 。

(2)将序列 $X'(k)$ 按长度为 $(n+1)$ 分入到互不重叠的 M 个盒子中,且记每个盒子为 $s=1, \dots, M$ 。

(3)在每个盒子里,利用标准最小二乘线性(或高阶)回归方法进行拟合回归得到该直线(或多项式)的回归值,得到“本地趋势” $X'_{n,s}(k)$ 。

(4)分别在每个盒子里计算方差

$$f_{DCCA}^2(n, s) = \frac{1}{n+1} \sum_{k=s}^{s+n} (X'(k) - X'_{n,s}(k)) \cdot (Y'(k) - Y'_{n,s}(k)) \quad (3)$$

(5)对所有 M 个盒子中得到的方差求均值,求得去趋势协方差

$$F_{DCCA}^2(n) = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M f_{DCCA}^2(n, s) \quad (4)$$

(6)反复计算,得到 $F_{DCCA}(n)$ 和 n 之间的关系, Hurst 值由 $\ln[F_{DCCA}(n)]/\ln(n)$ 线性回归的斜率得到。两个时间序列之间的长程互相关性表明,每个时间序列既有序列本身之前值的长记忆性,也有另一序列之前值的长期记忆。

2.2.2 去趋势偏互相关分析

去趋势偏互相关分析(DPXA)用于 3 个定量非平稳时间序列去除一序列对另外两序列影响后的长程偏互相关^[19]。DPXA 的长程互相关 Hurst 指数计算步骤如下。

(1)假定非平稳时间序列 $\{X(i)\}$, $\{Y(i)\}$ 和 $\{Z(i)\}$,其中 $i=1, \dots, N$ 。将整个时间序列分到 M 个互不重叠的盒子中,每个盒子包含 $(n+1)$ 个值,在每个盒子中利用回归分析计算残差,得到残差序列

$$X_z(i) = X(i) - b_{xz} \times Z(i) \quad (5)$$

$$Y_z(i) = Y(i) - b_{yz} \times Z(i) \quad (6)$$

(2)对残差序列 $\{X_z(i)\}$ 和 $\{Y_z(i)\}$,分别构造累加时间序列 $R_X(k) = \sum_{i=1}^k [X_z(i) - \overline{X_z(i)}]$ 和 $R_Y(k) = \sum_{i=1}^k [Y_z(i) - \overline{Y_z(i)}]$,其中 $k=1, \dots, N$ 。

(3)将序列 $\{R_X(k)\}$ 和 $\{R_Y(k)\}$ 分为长度等于 $(n+1)$ 的互不重叠的 M 个盒子,记每个盒子为 $s=$

1, ..., M。

(4)在每个盒子里,利用标准最小二乘线性(或高阶多项式)回归方法进行拟合回归得到该直线(或多项式)的回归值,记为“本地趋势” $R_X'_{n,s}(k)$ 和 $R_Y'_{n,s}(k)$,接下来,计算每个部分的协方差

$$f_{\text{DPCA}}^2(n, s) = \frac{1}{n+1} \sum_{k=s}^{s+n} (R_X(k) - R_X'_{n,s}(k) \cdot (R_Y(k) - R_Y'_{n,s}(k))) \quad (7)$$

(5)对 M 个盒子里得到的协方差求均值,得到去趋势协方差

$$F_{\text{DPCA}}^2(n) = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M f_{\text{DPCA}}^2(n, s) \quad (8)$$

(6)重复上述计算,得到 $F_{\text{DPCA}}(n)$ 与 n 的关系, Hurst 值由 $\ln[F_{\text{DPCA}}(n)]/\ln(n)$ 线性回归的斜率得到。

3 结果与分析

3.1 气象水文要素相关性的时间尺度演化特征

3.1.1 年降水量与年径流深

计算研究期内年降水量与年径流深序列的交叉小波功率谱(XWT)和交叉小波凝聚谱(WTC),见图3:粗黑线包围的范围表示通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平下的红噪声标准谱检验的区域;外围实线为影响锥曲线(COI),曲线以外的功率谱由于受到边界

效应的影响不予考虑;箭头表示相对位相差: $\rightarrow$ 表示两者变化位相一致, $\leftarrow$ 表示两者变化位相相反。交叉小波功率谱主要表征两个序列在高能量区的相关性,由图3(a)可知:在宏观上,年降水量与年径流深在1972—1988和1998—2004年两时域具有显著正相关性,两者间存在3个共振周期:(1)2~3 a(1972—1981和1999—2004年);(2)5 a左右(1984—1988年);(3)8 a左右(1973—1987年)。这表明渭河流域年降水量在1972—1988年对年径流深存在较强驱动作用,且表现为多时间尺度特征。1988年之后,受人类活动的直接(河道取水等)和间接(土地利用等)影响,实测径流序列表现出非平稳性,导致年降水量与年径流深的显著相关尺度减少甚至消失,暗示其驱动关系从降水主导改变为多元驱动。

交叉小波凝聚谱主要体现序列在中低能量区的相关性,由图3(b)可知:在局部微观上,整个时域年径流深和年降水量的相关性均较好,除4~6 a(1966—1984)、1~2 a(1963—1969)、1~6 a(2001—2012)共振周期外,其他时期在不同尺度上均表现出不显著强相关性。位相差表明,在整个时间域、不同周期尺度上降水量和径流深存在正相关或近似正相关关系,各个尺度的周期 R^2 多数在0.8以上,甚至接近1,这表明在低能量区,降水仍是影响径流变化的主要因素,且这种影响关系比较稳定。

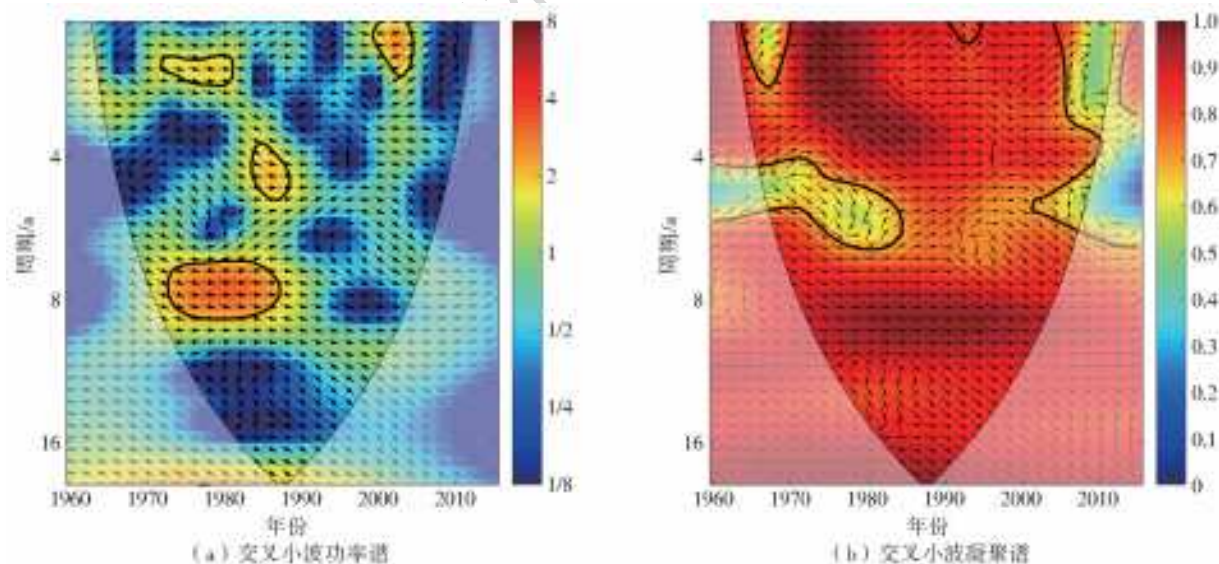


图3 年降水量与年径流深的交叉小波功率谱和交叉小波凝聚谱

Fig. 3 Cross wavelet transform wavelet coherence of annual precipitation and runoff depth time series

3.1.2 年蒸发皿蒸发量与年降水量

年蒸发皿蒸发量与年降水量的交叉小波功率谱和交叉小波凝聚谱见图4。图4(a)交叉小波功率谱显示,在宏观上,年蒸发皿蒸发量与年降水量为负相关,且存在3个共振周期:(1)3 a左右,高能量区覆

盖1964—1967年;(2)2 a左右(1998—2003年);(3)8 a左右,高能量区分布在1974—1988年,两个高能区段与降水-径流基本重叠。

图4(b)交叉小波凝聚谱则显示:在局部微观上,年蒸发皿蒸发量与年降水量之间出现了1~3 a

(1964—1968、1977—1980、1994—2005 年)和 7~12 a (1969—1992 年)的共振周期,且中低能量区的相关性较降水-径流略差。位相差表明:在整个时间域、不同周期尺度上降水量和蒸发量存在负相关或近似

负相关关系,黑色包线内的周期相关系数接近 1,这说明在相应时频域内,年蒸发皿蒸发与年降水量尽管处于中低能区,但相关性仍较好,表明降水对蒸发有较为重要的影响。

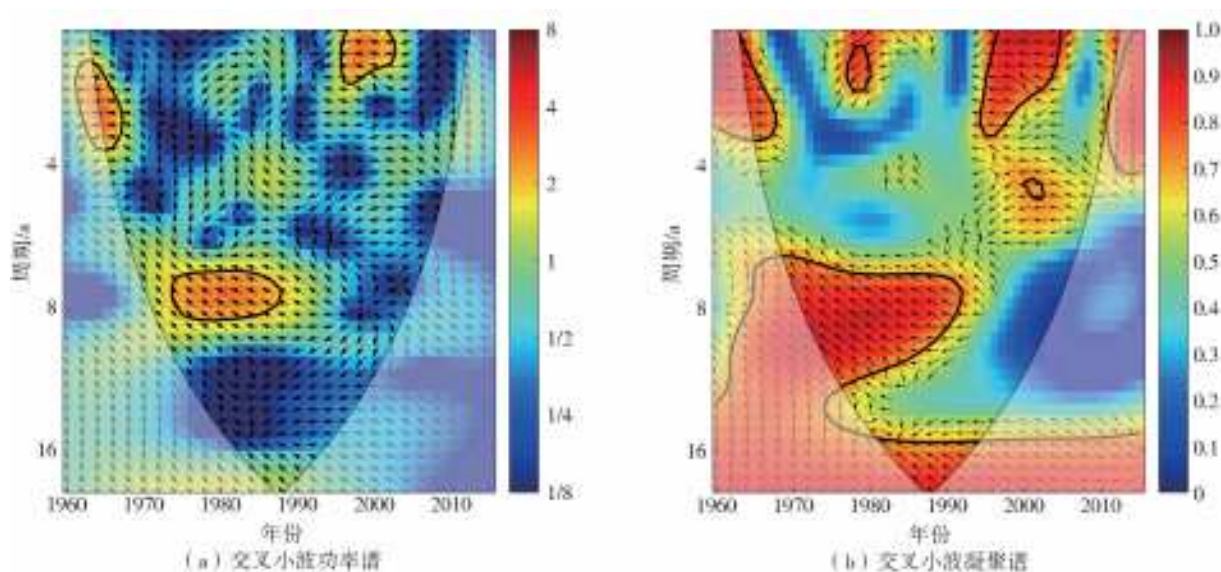


图 4 年蒸发皿蒸发量与年降水量的交叉小波功率谱和交叉小波凝聚谱

Fig. 4 Cross wavelet transform wavelet coherence of annual evaporation and precipitation time series

3.1.3 年蒸发皿蒸发量与年径流深

年蒸发皿蒸发量与年径流深的交叉小波功率谱和交叉小波凝聚谱见图 5。交叉小波功率谱图 5(a)显示,从宏观上,两者显著负相关性仅仅局限于 1964—1988 和 1998—2003 年,存在 3 个共振周期: (1) 2~4 a (1963—1968 年); (2) 8 a 左右 (1974—1985 年); (3) 1 a 左右 (1998—2003 年)。其与降水-径流和降水-蒸发的相关性结构类似,揭示了降水、径流和蒸发所构成系统的主导周期(1~2 a 和 8 a)。

交叉小波凝聚谱图 5(b)显示,在中低能量区上,年蒸发皿蒸发量与年径流深间出现了 1~12 个准共振周期(1963—1993、1977—1980 和 1997—2007 年),揭示出在高频区被遗漏的显著共振周期。位相差表明,在整个时间域、不同周期尺度上年径流深和蒸发存在负相关或近似负相关关系。红色区域表明,在 1963—1993 年,径流与蒸发相关性较好,而在枯水年份,蒸发对径流量的影响更为强烈。

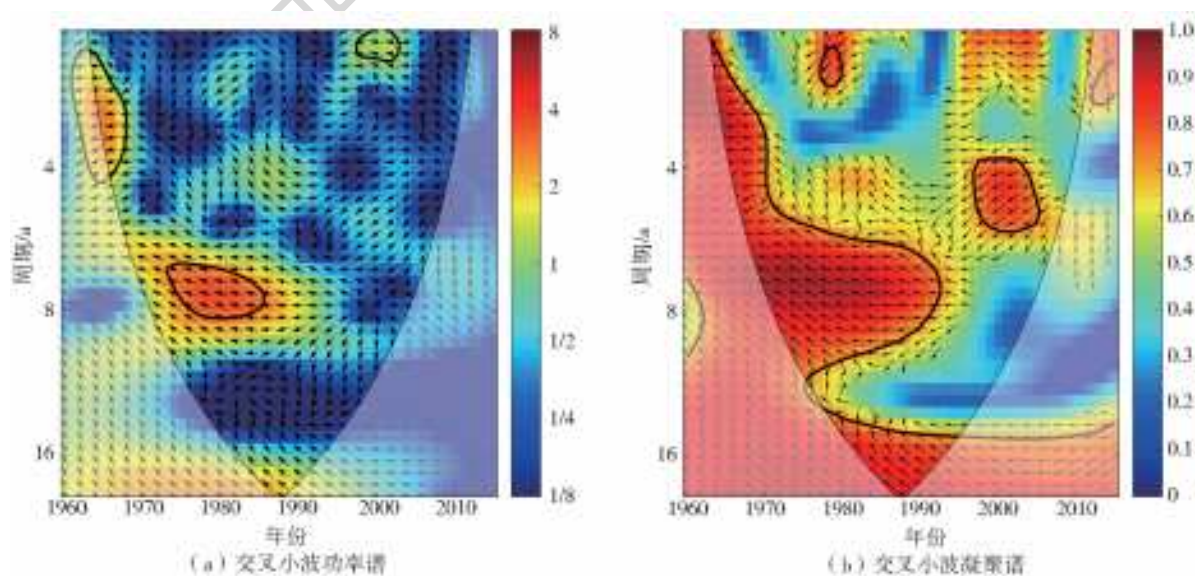


图 5 年径流深与年蒸发皿蒸发量的交叉小波功率谱和交叉小波凝聚谱

Fig. 5 Cross wavelet transform and wavelet coherence of annual runoff and evaporation time series

3.2 长程相关性分析

交叉小波分析从周期的角度和相位的角度宏观分析了渭河流域过去时段降水、径流和蒸发在不同频域的相关性特征和演化过程,但对未来两者的作用关系是无法预知的;而长程相关性分析则可以弥补交叉小波分析的短板,对序列的持续性、结构性及互馈性开展研究。

对渭河流域气象水文时间序列进行归一化处理,分别采用 DFA、DCCA、DPXA 等 3 种方法进行 Hurst 指数的计算,计算结果见表 1。表中: $H=0.5$ 表明不存在相关性(白噪); $H>0.5$ 表明存在长程相关性; $H<0.5$ 表明存在长程反相关性。

表 1 不同气象水文序列间的 Hurst 指数

Tab. 1 Hurst index between different meteorological and hydrological time series

序列	H_{DFA}	序列	H_{DCCA}	序列	H_{DPXA}
径流	0.900 7	降水-径流	0.774 3	降水-径流 (蒸发)	1.134 8
降水	0.607 5	降水-蒸发	0.286 2	降水-蒸发 (径流)	0.965 5
蒸发	0.801 8	径流-蒸发	0.444 2	蒸发-径流 (降水)	0.692 6

3.2.1 长程相关性的可持续性

绘制 DFA 方法计算得到的时间序列自身的去趋势协方差平方根与时间 n 的双对数坐标,见图 6。

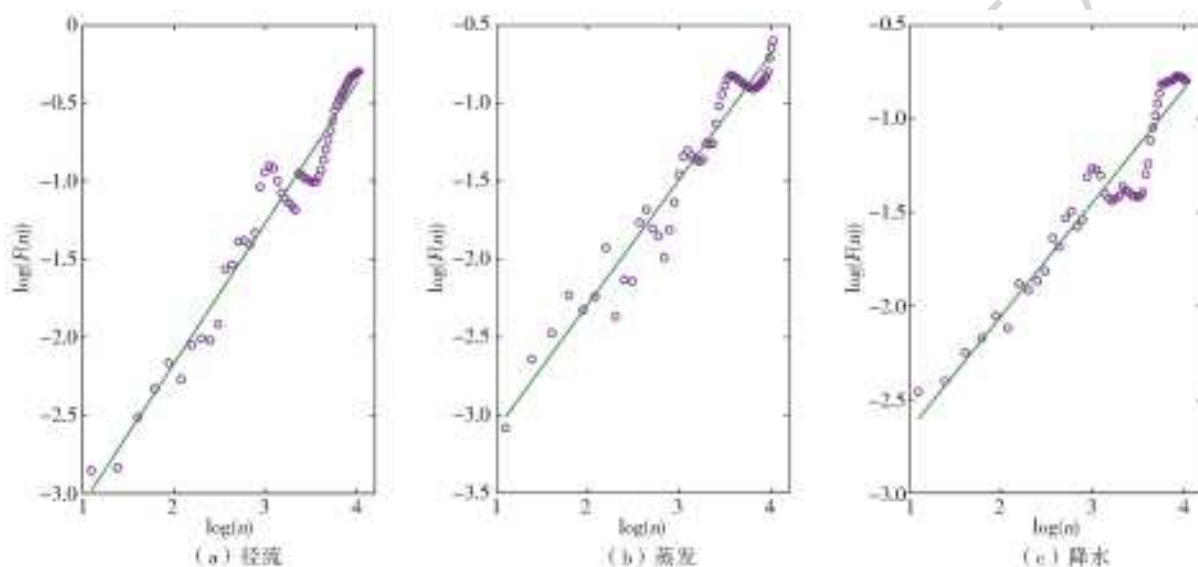


图 6 $F_{DFA}(n)$ 和 n 取对数拟合

Fig. 6 The log-log plot for the square root of the detrended covariance $F_{DFA}(n)$ vs time scale n

由表 1 和图 6 可知,渭河流域径流、蒸发和降水序列的 Hurst 指数均大于 0.5,说明降雨、径流和蒸发这 3 个时间序列均拥有之前的长期记忆,即存在长程自相关性,未来将会继续长期记忆或趋势持续发展。三者相比,径流和降水的持续性更强,按照历史趋势演化的可能性更大。

3.2.2 长程相关性的结构性

图 7 给出了 $F_{DCCA}(n)$ 和 n 取对数后的拟合图,其中降水-径流拟合图的拟合效果最好,蒸发-径流、蒸发-降水拟合图的拟合效果较差。利用 DCCA 计算得到的两因素间的 Hurst 指数分别为 0.774(降水-径流)、0.286(降水-蒸发)、0.444(径流-蒸发)。这表明:在不考虑第三因素影响的情况下,降水序列和径流序列之间存在良好长程互相关性,即在未来降水与径流的关系会持续下去,表现为长记忆特征,径流依然会跟随降水的变化而呈现同向变化;而降水-蒸发以及径流-蒸发间的长程

相关性与降水-径流间不同,表现出长程反相关性。由于 3 个因子间的互相影响存在,且并没有去除掉径流或降水的影响,这种长程反相关性并不能判定为图 7 两者“真实”的相关关系,需要进一步分析。

3.2.3 长程相关性的互馈性

由表 1 可知,利用 DPXA 计算得到的 Hurst 指数分别为 1.134 8(降水-径流(蒸发))、0.965 5(降水-蒸发(径流))、0.692 6(蒸发-径流(降水)),Hurst 指数相比于 DCCA 的结果得到了改善,去除一个因素对另外两个因素相关关系的影响后,降水-蒸发和径流-蒸发间长程相关性发生变异,从而降水、径流、蒸发两两间均表现出长程互相关性。图 8 给出了 $F_{DPXA}(n)$ 和 n 取对数后的拟合图,其中,降水-径流间在扣除蒸发影响后的 $F_{DPXA}(n)$ 和 n 取对数拟合图拟合效果更佳。扣除第三因素后的长程相关性变化,暗示了降水、径流和蒸发这 3 个要素间长程相关性的互馈性,降水序列有径流

(蒸发)序列的强记忆性,而径流-蒸发(降水)序列存在微弱长程互相关性。在物理机制上,径流、蒸发、降水这 3 个因子的循环中,降水与径流存在成因关系,而蒸发的主要限制是水量且主要来源是

降水,故降水-径流(蒸发)、降水-蒸发(径流)间的长程相关特征不难理解,而径流-蒸发间在扣除降水影响后成因关系不显著,因此其长程互相关性相对较弱。

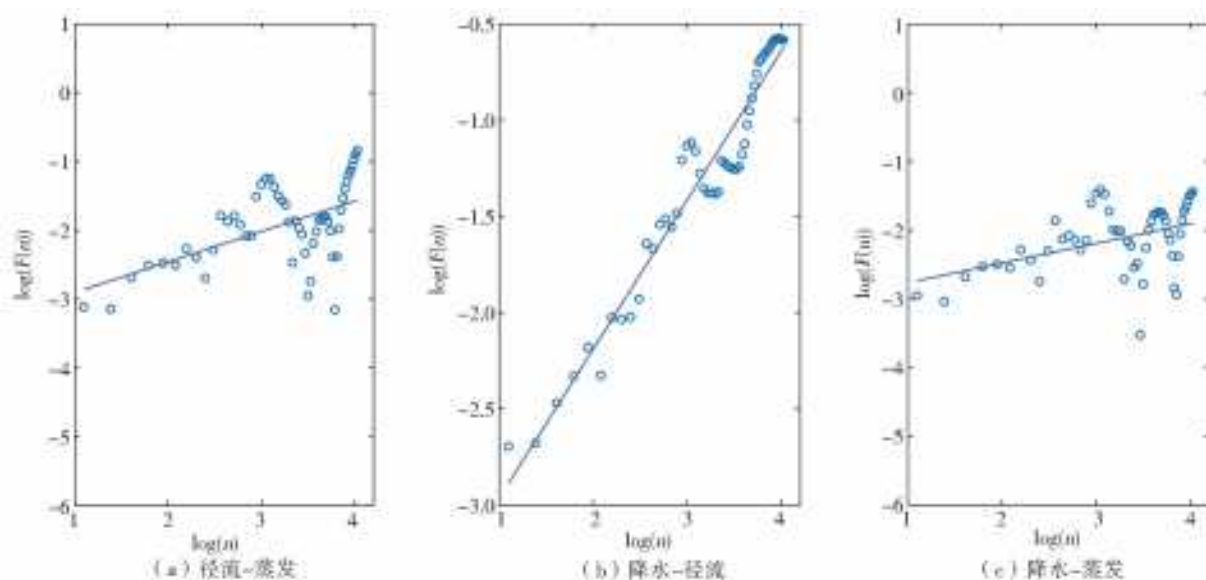


图 7 $F_{DCCA}(n)$ 和 n 取对数拟合

Fig. 7 The log-log plot for the square root of the detrended covariance $F_{DCCA}(n)$ vs time scale n

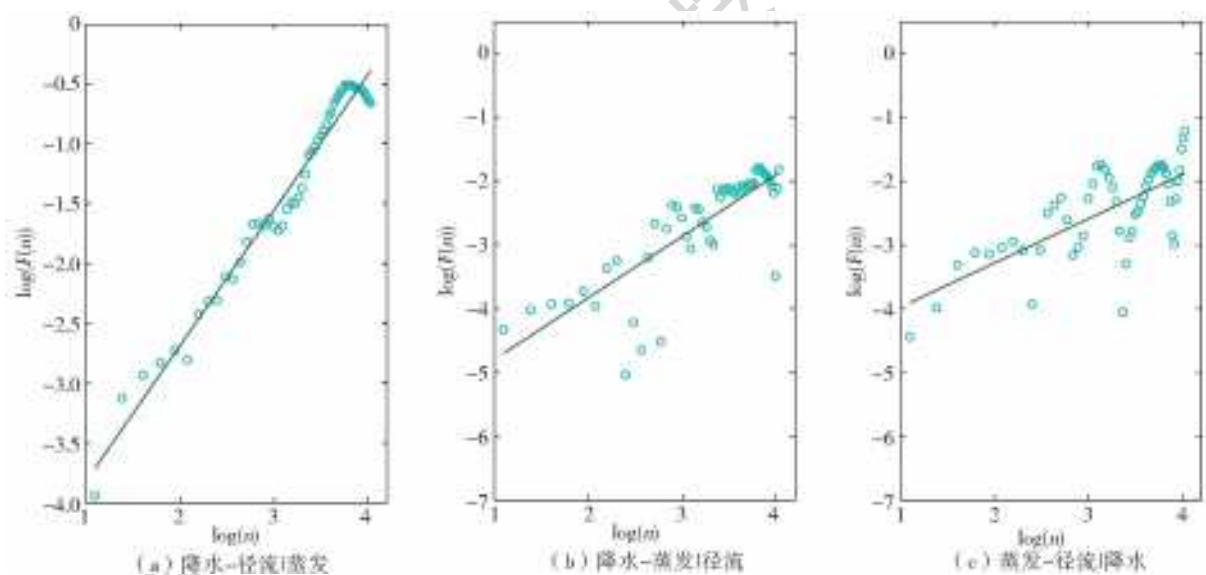


图 8 $F_{DPXA}(n)$ 和 n 取对数拟合

Fig. 8 The log-log plot for the square root of the detrended covariance $F_{DPXA}(n)$ vs time scale n

3.3 长程偏互相关变异特征

为了验证 DPXA 计算结果的合理性,并分析偏互相关性在时域上的变化特征,本文以 30 a(步长)为滑窗对其进行逐段检验。滑窗算法是根据指定的单位长度来框住时间序列,然后计算框内的统计指标,相当于一个长度指定的滑块在刻度尺上面滑动,每滑动一个单位即可反馈滑块内的统计数据^[27]。本文在每个滑窗里进行去趋势偏互相关分析(DPXA),即可得到相应的偏互相关系数 H_{ODPXA} ,计算结果见图 9。

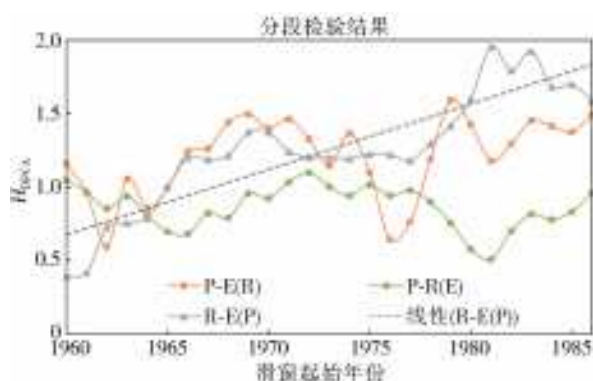


图 9 分段检验的滑窗图

Fig. 9 Section test results by the sliding window

结果显示,随着滑窗的移动, $H_{DPXA}^{PRE(R)}$ 在小范围内上下波动,整体有微弱减小趋势,说明降水与径流在时域上表现出相对稳定的长程相关性,可认为在人类活动及气候变化的影响下,降水和径流的长程相关性并未遭到实质性的破坏,但存在缓慢的衰减趋势。 $H_{DPXA}^{PRE(R)}$ 总体上呈持续增长的趋势,长程相关关系于1962年由长程反相关突变为长程正相关,随后长程相关性持续增强,1981年和1983年时达到了整个时域内的极大值,这表明在渭河流域径流和蒸发愈发表现出紧密的相关性,流域蒸发日益成为驱动径流衰减变化的重要因子。 $H_{DPXA}^{PRE(R)}$ 上下波动较大,总体上有上升趋势,但长程相关性并未发生实质性突变。

由于本次检验中扣除了变量序列中趋势变化的影响,而渭河流域蒸发变大、降水减少的趋势是客观存在的事实,因此笔者认为导致渭河流域蒸发皿蒸发量上升的主要原因是平均气温和日照时数的增加、降水量的减少,且前两者的影响大于降水缩减引发的蒸发量变化^[28]。总的来讲,降水、蒸发、径流这3个气象水文要素中仅有蒸发与径流的长程互相关性在时域上表现为显著的增强变化,这意味着未来蒸发量变化可能引发更大的径流波动,并逐渐成为影响干旱区域水资源演变的主导因素。因此,对一个区域而言,在降水不变的情况下,控制无效蒸发就成为提升区域水资源可利用量的一个重要举措。

4 结 论

(1)在过去长时域内,蒸发、降水、径流任意两因子之间在不同时间频域内表现出差异相关性,相关结构上存在1~2和8a的相似主导周期,宏观上降水-径流间多尺度相关结构发生退化,共振周期减少。

(2)降水、蒸发、径流时间序列都存在良好的长程自相关性,时间序列都具有自身之前序列的显著长期记忆,即在流域水文循环中,当前时间段内的降水量、径流量、蒸发量其产生的影响存在很大的时间滞后特征;降水-径流间表现出长程相关性,而降水-蒸发和径流-蒸发呈长程反相关性,三者间呈现出不同的长程互相关结构;扣除第三因子影响后,降水-蒸发和径流-蒸发长程相关性发生变异,表现为降水-径流、降水-蒸发和径流-蒸发两两间均呈长程互相关性,暗示了降水、径流和蒸发三者间长程相关性的互馈特征。总体上,渭河流域降水、径流和蒸发序列表现出自身序列的记忆性和对其他序列的记忆性,表现出长程自相关和长程互相关的不同相关结

构及长程相关性互馈性。从方法上看,DPXA的结果相比于DCCA更具有说服力。

(3)透过滑窗分析可知,降水-径流、降水-蒸发之间的长程偏互相关性在整个研究时域上没有发生变异,未来降水的增加将引起径流量增大,并间接引起受渭河流域可蒸发水量制约的蒸发量增大。径流-蒸发长程互相关性于1962年由长程反相关变异为长程相关,随后长程相关性持续增强,标志着未来蒸发量的变化可能引发更大的径流波动,甚至成为直接导致河道水量减少的主要驱动因素。

参考文献:

- [1] 刘昌明,刘小莽,郑红星. 气候变化对水文水资源影响问题的探讨[J]. 科学与社会,2008,21-27. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1949.2008.02.005.
- [2] 张洪波,王斌,兰甜,等. 基于经验模态分解的非平稳水文序列预测研究[J]. 水力发电学报,2015,34(12):42-53. DOI:10.11660/slfdbx.20151205.
- [3] 鲁帆,肖伟华,严登华,等. 非平稳时间序列极值统计模型及其在气候-水文变化研究中的应用综述[J]. 水利学报,2017,48(4):379-389. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20160281.
- [4] WANG D, ALIMOHAMMADI N. Responses of annual runoff, evaporation, and storage change to climate variability at the watershed scale[J]. Water Resources Research, 2012,48(5):5546. DOI:10.1029/2011WR011444.
- [5] WU Z, HUANG N E, LONG S R, et al. On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(38):14889-14894. DOI:10.1073/pnas.0701020104.
- [6] SAGARIKA S, KALRA A, AHMAD S. Evaluating the effect of persistence on long-term trends and analyzing step changes in streamflows of the continental United States[J]. Journal of Hydrology, 2014,517(2):36-53. DOI:10.1016/j.jhydrol.2014.05.002.
- [7] CHAPPELL N A, TYCH W. Identifying step changes in single streamflow and evaporation records due to forest cover change[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(1):100-116. DOI:10.1002/hyp.8115.
- [8] PENG C K, HAVLIN S, STANLEY H E, et al. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series[J]. Chaos, 1995,5(1):82-87. DOI:10.1063/1.166141.
- [9] XIONG H, SHANG P J. Detrended fluctuation analysis of multivariate time series[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2017, 12-21. DOI:10.1016/j.cnsns.2016.04.035.

- [10] KRISTOUFEK, LADISLAY. Detrending moving-average cross-correlation coefficient: Measuring cross-correlations between non-stationary series[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, 406: 169-175. DOI: 10. 1016/j. physa. 2014. 03. 015.
- [11] PODOBNIK B, STANLEY H E. Detrended cross-correlation analysis: a new method for analyzing two non-stationary time series[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(8): 84-102. DOI: 10. 1103/PhysRevLett. 100. 084102.
- [12] 刘亚敏. 三个非平稳时间序列之间的去趋势偏互相关研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- [13] HE L Y, CHEN S P. Nonlinear bivariate dependency of price-volume relationships in agricultural commodity futures markets: A perspective from multifractal detrended cross-correlation analysis[J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications, 2011, 390(2): 297-308. DOI: 10. 1016/j. physa. 2010. 09. 018.
- [14] CAO G, XU L, CAO J. Multifractal detrended cross-correlations between the Chinese exchange market and stock market[J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications, 2012, 391(20): 4855-4866. DOI: Multifractal detrended cross-correlations between the Chinese exchange market and stock market.
- [15] HE L Y, CHEN S P. A new approach to quantify power-law cross-correlation and its application to commodity markets[J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications, 2011, 390(21-22): 3806-3814. DOI: 10. 1016/j. physa. 2011. 06. 013.
- [16] MARINHO E B S, SOUSA A M Y R, ANDRADE R F S. Using detrended cross-correlation analysis in geophysical data[J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications, 2013, 392(9): 2195-2201. DOI: 10. 1016/j. physa. 2012. 12. 038.
- [17] VASSOLER R T, ZEBENDE G F. DCCA cross-correlation coefficient apply in time series of air temperature and air relative humidity[J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications, 2012, 391(7): 2438-2443. DOI: 10. 1016/j. physa. 2011. 12. 015.
- [18] 吴晓升, 江岳文. 基于去趋势互相关分析法的光照、温度和风速互相关性分析[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 97-106, 123. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.tm>.
- [19] QIAN X Y, LIU Y M, JIANG Z Q, et al. Detrended partial cross-correlation analysis of two nonstationary time series influenced by common external forces[J]. Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, And Soft Matter Physics, 2015, 91(6): 062816. DOI: 10. 1103/PhysRevE. 91. 062816.
- [20] YUAN N, FU Z, ZHANG H, et al. Detrended partial-cross-correlation analysis: A new method for analyzing correlations in complex system[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 1-7. DOI: 10. 1038/srep08143.
- [21] 郭渠, 孙卫国, 程炳岩, 等. 我国西北地区气候变化与北极涛动的交叉小波分析[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(6): 811-818. DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-7097. 2008. 06. 008.
- [22] 孙卫国, 程炳岩. 交叉小波变换在区域气候分析中的应用[J]. 应用气象学报, 2008, 19(4): 479-487. DOI: 10. 11898/1001-7313. 20080412.
- [23] 王亚敏, 张勃, 郭玲霞, 等. 地磁 Ap 指数与太阳黑子数的交叉小波分析及 R/S 分析[J]. 地理科学, 2011, 31(6): 747-752.
- [24] 刘友存, 刘志方, 郝永红, 等. 基于交叉小波的天山乌鲁木齐齐河出山径流多尺度特征研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1564-1572. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2013. 0173.
- [25] 邵骏. 基于交叉小波变换的水文多尺度相关分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 22-26.
- [26] 孙文博, 张洪波, 曹巍. 基于 DPCA 方法对渭河流域降水-径流-蒸发序列的长程互相关性研究[J]. 世界家苑, 2018.
- [27] 余宇峰, 朱跃龙, 万定生, 等. 基于滑动窗口预测的水文时间序列异常检测[J]. 计算机应用, 2014, 34(8): 2217-2220. DOI: 10. 11772/j. issn. 1001-9081. 2014. 08. 2217
- [28] 胡凝, 高蓓. 陕西渭河流域蒸发皿蒸发量的气候变化分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(33): 20877-20880. DOI: 10. 3969/j. issn. 0517-6611. 2011. 33. 205